

0074030

B R O W N , B O V E R I & C I E

Mannheim

Mp.-Nr. 613/81

AKTIENGESELLSCHAFT

31. Aug. 1981

ZPT/P2-La/Br

Supraleitender Schalter

Die Erfindung bezieht sich auf einen supraleitenden Schalter nach dem Oberbegriff des Patentanspruches 1.

Das Hauptkennzeichen eines Supraleiters, der völlige Verlust des elektrischen Widerstandes unterhalb einer kritischen Temperatur, eines kritischen Magnetfeldes und einer kritischen Strombelastung, wird bei supraleitenden Schaltern ausgenutzt, indem wenigstens einer dieser kritischen Werte von außen beeinflusst wird, sodaß ein Übergang des Supraleiters aus der Supraleitungsphase in die Normalleitungsphase oder umgekehrt erfolgt. Hierbei ändert sich der Widerstandswert des Supraleiters sprunghaft von Null im supraleitenden Zustand auf einen relativ hohen Wert im Normalleitungszustand.

In einem supraleitenden Stromkreis kommt diese sprunghafte Widerstandsänderung einer Schaltfunktion gleich.

(K. Grawatsch, Grundlegende Untersuchungen über die Einsatz-

0074030

613/81

2

möglichkeiten supraleitender Schalter in der kryogenen Energietechnik, Kernforschungsanlage Jülich, JÜl-1132-SE, Nov. 1974).

Der Begriff "supraleitender Schalter" ist in der Literatur nicht scharf abgegrenzt. Es wird im folgenden mit diesem Begriff der Bereich eines supraleitenden Schaltkreises bezeichnet, dessen elektrischer Widerstandswert durch gesteuertes Über-oder Unterschreiten der genannten kritischen Werte beeinflusst wird. Solch ein supraleitender Schalter ist im allgemeinen durch Zu- und Ableitungen mit übrigen Elementen des supraleitenden Schaltkreises verbunden. Er kann jedoch auch Bestandteil eines Elementes, z.B. einer supraleitenden Spule sein.

Für die Herstellung von supraleitenden Schaltern werden u.a. Drähte verwendet, die aus supraleitenden Filamenten, z.B. aus NbTi oder Nb_3Sn bestehen. Die Filamente sind in einer Matrix aus bsw. CuNi mit relativ hohem spezifischen elektrischen Widerstand eingebettet.

Die Herstellung von supraleitenden Drähten für Niob-Titan-Supraleiter ist wegen der hohen Duktilität des NbTi relativ problemlos. Die niedrige kritische Temperatur hat eine geringe elektrische Stabilität der supraleitenden Drähte zur Folge, wodurch ein supraleitender Schalter aus NbTi nicht immer den gestellten Anforderungen gerecht wird. Niob-Titan-Supraleiter haben den Nachteil, einer relativ tiefen kritischen Temperatur von ca. 9,5K und eines ebenfalls tiefen kritischen Magnetfeldes von ca. 12T. Supraleitende Schalter aus diesem Material müssen den kritischen Werten Rechnung tragen, wodurch die Einsatzmöglichkeiten stark eingeengt sind.

0074030

613/81

3

Die metallurgischen Herstellungsverfahren für supraleitende Drähte sind für Nb₃Sn-Supraleiter sehr aufwendig. Zur Bildung des supraleitenden Materials muß eine Diffusionsglühung bei bsw. 7000°C für ca. 60 Stunden durchgeführt werden. Wird diese Glühung vor dem Anordnen der Drähte (z.B. Wickelprozess) durchgeführt, so besteht beim Anordnen die Gefahr der Beschädigung des sehr spröden Nb₃Sn-Materials, was sich erst an dem fertigen Schalter überprüfen läßt. Wird die Glühung nach dem Anordnungsprozess durchgeführt so muß der gesamte Schalter einschließlich der Isolation geglüht werden, was an die Isolation und die verwendeten Struktur- und Kontaktierungsmaterialien besondere Anforderungen bezüglich der Temperaturbeständigkeit stellt.

Es ist Aufgabe der Erfindung, supraleitende Schalter unter Vermeidung der Nachteile bei Verwendung von Filamentleitern herzustellen.

Gemäß der Erfindung wird diese Aufgabe dadurch gelöst, daß die Supraleiter des Schalters aus Faserleitern, die aus mit einer supraleitenden Schicht versehenen Fasern bestehen, hergestellt sind.

Es ist bekannt, Kohlenstofffasern mit einer dünnen Schicht einer Niobverbindung der allgemeinen Formel NbC_xN_y und einer äußeren hoch leitfähigen Materialschicht zu versehen. Derartige supraleitende Niobcarbonnitrid-Schichten können kontinuierlich hergestellt werden, bsw. kann aus dampfförmigen Niobchlorid in einer Wasserstoffatmosphäre bei etwa 6000°C metallisches Niob auf den Kohlenstofffasern (Kohlenstofffilamenten) abgeschieden werden. Dieses metallische Niob wird anschließend in einer Ammoniak- und Methanatmosphäre bei

0074030

613/81

4

etwa 10000°C in die supraleitende Niobcarbonitridverbindung umgewandelt (DE-AS 28 56 885; K.Brennfleck et al, Chemical Vapor Deposition of Superconducting Niobium Carbonitride Films on Carbon Fibres, Seventh International Conference on Chemical Vapor Deposition, October 14-19, 1979, Los Angeles, Ca./USA).

Bisher sind Supraleiter aus Filamentleitern in Drahtform und als Faserleiter bekannt. Um die Unterschiede hervorzuheben, wird im folgenden der Begriff "Filamente" für die fest in eine metallische Matrix eingebetteten supraleitenden Fäden aus bsw. $NbTi$ oder Nb_3Sn (Filamentleiter) benutzt, und der Begriff "Fasern" gilt für unverflochten und ungebunden vorliegende Fäden aus jeglichem Material, z.B. C-Fasern, Bohrfasern, Stahlfasern.

Ein supraleitender Schalter gemäß der Erfindung ist zweckmäßigerweise derart herzustellen, daß mehrere 1000 mit einer supraleitenden Schicht versehene Fasern mit einer Matrix einer im allgemeinen relativ hochohmigen Metallschicht umgeben und zu einem Bündel zusammengefaßt werden, und daß dieses Faserbündel durch eine Isolationsschicht umgeben wird. Das isolierte Faserbündel wird zu einer vorzugsweise niederinduktiven Leiteranordnung verwunden, in Kunststoff getränkt und in einer Form ausgehärtet. Nach dem Aushärten ist die Verbindung so stabil, daß die Form entfernt werden kann und ein Aufnahmekörper nicht erforderlich ist. Die jedes Bündel umgebende Isolationsschicht kann z.B. eine Umbandelung mit Folie oder eine Umspinnung oder Umflechtung von Glasfasern sein.

Im Gegensatz hierzu werden bei der Herstellung von supraleitenden Spulen zur Gewährleistung einer guten Wärmeab-

0074030

613/81

5

führung und zur Stabilisierung des Supraleiters trotz Auftretens hoher Felder die Filamente mit einem gut leitenden Material (in der Regel Kupfer) ausreichender Schichtdicke umgeben (G. Meyer, R. Maix, Brown Boveri Mitteilungen 1970 57 (8-9) 355-362). Hierdurch kann eine ausreichende elektrische und mechanische Stabilität des Leiters erreicht werden und die niederohmige Matrix kann kurzzeitig den Strom aufnehmen, sobald im Supraleitungsmaterial ein Widerstand auftritt.

Bei supraleitenden Schaltern besteht jedoch nicht die Forderung nach einem elektrisch gut leitenden Matrixmaterial, das notfalls den Strom mit möglichst geringen Verlusten kurzfristig aufnehmen kann. Supraleitende Schalter sollen in der Normalleitungsphase einen Widerstand aufweisen, der den Stromdurchfluß bei Übergang von der supraleitenden Phase in die Normalleitungsphase sprunghaft stark reduziert. Der hierfür notwendige Normalleistungswiderstandswert resultiert im wesentlichen aus dem geforderten Schaltverhalten und der Schaltungsanordnung, in der der supraleitende Schalter eingesetzt werden soll. Dabei ist die Grenzlast, das ist die Strombelastbarkeit, beim Übergang von der Supraleitung zur Normalleitung, zu beachten, um ein "Ausbrennen" des Schalters zu vermeiden.

Die Forderungen zur Stabilisierung sind bei supraleitenden Schaltern nicht so hoch wie bei Spulen, da die Windungen des Schalters bsw. bipolar angeordnet werden können, so daß ein Auftreten hoher Magnetfelder vermieden wird. Durch bipolare Windungsanordnungen lassen sich darüber hinaus niederinduktive Schalter herstellen.

Zur Realisierung der Anforderungen kann vorzugsweise

0074030

613/81

6

wenigstens in einem Bereich des Supraleiters des Schalters die Schichtdicke der Matrix, mit der die supraleitenden Fasern umgeben sind, so bemessen werden, daß der erwünschte Normalleistungswiderstandswert für den Schalter realisiert wird und andererseits eine ausreichende Stabilisierung in der Supraleitungsphase gewährleistet ist. Diese Anforderungen können darüber hinaus in vorteilhafter Weise auch durch Auswahl eines geeigneten Matrixmaterials erfüllt werden.

Durch die hohe mechanische Festigkeit der Faserleiter kann die Schichtdicke der Matrix, das ist der Abstand zwischen zwei supraleitenden Fasern, auch bei Verwendung von Kupfer sehr klein gehalten werden, so daß sich ein relativ hoher Normalleistungswiderstand ergibt. Zur Erzielung eines hohen Normalleistungswiderstandes kann als Matrixmaterial jedoch auch ein Material geringerer elektrischer Leitfähigkeit jedoch ausreichender Wärmekapazität, um den Schalter bei hohen Schaltleistungen gegen Ausbrennen zu sichern, verwendet werden (z.B. CuNi).

Es ist von Vorteil die Wicklung einer supraleitenden Spule, die mit einem erfindungsgemäßen supraleitenden Schalter in einem Stromkreis angeordnet ist, ebenfalls aus Faserleitern, die aus mit einer supraleitenden Schicht versehenen Fasern bestehen, herzustellen. Dieser Vorteil tritt dann besonders augenfällig hervor, wenn der supraleitende Schalter und die supraleitende Spule aus einem durchgehenden Faserleitungsstrang bestehen und so der Supraleiter des Schalters mit dem der Spule wenigstens mit jeweils einem Ende materialeinheitlich, unter Vermeidung einer Materialinhomogenität, die durch eine aufwendig herstellbare Verbindungsstelle (G. Luderer et al, Superconducting joint between multifilamentary wires, Cryogenics 14 (1974) 518) gegeben sein kann, miteinander

0074030

613/81

7

verbunden sind.

Bei einem Schaltkreis, der einen supraleitenden Schalter und eine supraleitende Spule enthält, deren Supraleiter aus Faserleitern aufgebaut sind, ist es vorteilhaft, daß die Werte der Schichtdicke der Matrix und/oder der Leitfähigkeit des Matrixmaterials im Bereich des Supraleiters des Schalters geringer sind, als die entsprechenden Werte des Supraleiters der Spule. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, daß die Anforderungen an den Schalter bezüglich Normalleitungswiderstand und an die Spule bezüglich Stabilisierung gleichzeitig erfüllt werden. Beim Aufbringen des Matrixmaterial werden für den Bereich des Schalters und den Bereich der Spule hinsichtlich Schichtdicke und/oder Matrixmaterial unterschiedliche Verfahren verwendet.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung liegt darin, daß in die Nähe der Faserleiter des Schalters wenigstens ein isolierter Heizdraht angeordnet ist. Durch einen innigen Wärmekontakt zwischen Heizdraht und Faserleiter kann eine relativ kurze Zeitkonstante für die Auslösung des Schalters (Übergang in den Normalleitungszustand in Folge Erwärmung) realisiert werden.

Erfindungsgemäß kann zur magnetischen Auslösung des Schalters (Überschreiten des kritischen Magnetfeldes am Ort der Faserleiter) in der Nähe des Faserleiters des Schalters ein zusätzlicher, ein Magnetfeld erzeugender Faserleiter derart angeordnet werden, daß in dessen Magnetfeldbereich die Faserleiter des Schalters verlaufen. Durch diese Anordnung kann im allgemeinen eine geringere Auslösezeit als bei temperaturbedingter Auslösung realisiert werden.

0074030

513/81

8

Es kann auch eine Kombination von thermischer und magnetischer Auslösung vorteilhaft sein.

An Hand der Zeichnung wird eine Schaltungsanordnung mit einem erfindungsgemäßen supraleitenden Schalter näher erläutert.

Die einzige Figur zeigt ein Prinzipschaltbild eines induktiven supraleitenden Energiespeichers mit supraleitendem Schalter, Ladekreis und Lastkreis.

Ein Energiespeicherkreis bestehend aus einem supraleitenden Schalter 1 und einem Energiespeicher in Form einer supraleitenden Spule 2, die zu einem Kreis zusammengeschaltet sind, befindet sich in einem, durch eine gestrichelte Linie angedeuteten Kryostaten 3. Die supraleitende Spule 2 ist magnetisch mit einer Koppelspule 4 gekoppelt, diese liegt mit einem Ladekreisschalter 5 und einer Gleichstromquelle 6 in einem Ladekreis und mit einem Lastkreisschalter 7 und einer Magnetfeldspule mit induktiver Last 8 und ohmscher Last 9 in einem Lastkreis.

Auf den supraleitenden Schalter 1 wirkt ein Heizwiderstand 10 ein, der durch eine Stromversorgung 11 bei geschlossenem Heizkreisschalter 12 den supraleitenden Schalter aufheizt und von der Supraleitungsphase in die Normalleitungsphase überführt. Bei geöffnetem Heizkreisschalter 12 wird der supraleitende Schalter 1 durch den Kryostaten heruntergekühlt und in die Supraleitungsphase übergeführt.

Die Wirkungsweise der Schaltungsanordnung ist folgende:
Zum Laden des Energiespeichers wird die Koppelspule 4 zunächst durch die Gleichstromquelle 6 aufgeladen, wobei der Ladekreisschalter 5 geschlossen und der Lastkreisschalter 7

613/81

9

0074030

geöffnet ist. Der supraleitende Schalter 1 befindet sich ebenfalls im offenen normalleitenden Zustand bis der Ladevorgang abgeschlossen ist. Wenn der Strom im Ladekreis konstant gehalten wird, und die Spannung über die Koppelspule 4 nur noch dem ohmischen Spannungsabfall entspricht, ist der Ladevorgang abgeschlossen. Der supraleitende Schalter 1 wird geschlossen, d.h. er wird in den supraleitenden Zustand übergeführt, indem der Heizkreisschalter 12 geöffnet wird und der supraleitende Schalter in Folge der Kryostattemperatur unter die kritische Temperatur abgekühlt wird. Der Ladekreisschalter 5 wird geöffnet. Durch die Unterbrechung des Ladestromes I_L wird die Energie der Koppelspule 4 in die supraleitende Spule 2 getrieben. Es fließt nun für praktisch beliebige Dauer ein verlustloser Strom I_S im Energiespeicherkreis. Die supraleitende Speicherspule 2 kann in eine Magnetfeldspule 8,9 entladen werden. Hierzu wird der Lastkreisschalter 7 geschlossen und der supraleitende Schalter 1 in Folge schließens des Heizkreisschalters 12 und aufheizens des Heizwiderstandes 10 geöffnet.

Der Energiespeicherkreis, der aus supraleitenden Schalter 1 und supraleitender Spule 2 aufgebaut ist besteht aus einem durchgehenden Faserleiterstrang, der im Bereich der Spule 2 eine magnetfelderzeugende Wicklungsanordnung aufweist und im Bereich des Schalters 1 bipolar angeordnet ist. Die Matrix in die die einzelnen supraleitenden Fasern des Faserleiterstranges eingebettet sind, besteht im Bereich der Spule 2 zur Gewährleistung guter Wärmeleitung und hoher Stabilität aus Kupfer. Im Bereich des Schalters, in dem ein hoher Normalleitungswiderstand gefordert wird, besteht die Matrix aus CuNi.

0074030

613/81

10

A n s p r ü c h e

1. Supraleitender Schalter (1), dessen elektrischer Widerstand durch gesteuertes Überschreiten wenigstens eines der kritischen Werte der Temperatur, des Magnetfeldes und der Strombelastung von Null in einen hohen, den Schaltkreis, in dem der supraleitende Schalter (1) angeordnet ist, angepaßten Wert übergeführt wird, dadurch gekennzeichnet, daß der supraleitende Schalter (1) aus Faserleitern aus mit einer supraleitenden Schicht versehenen Fasern besteht.

2. Supraleitender Schalter (1) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Faserleiter mit einer wärmeableitenden Matrix umgeben sind, deren Schichtdicke (Abstand zwischen zwei Faserleitern) sowohl den erwünschten Normalleitungswiderstandswert für den Schalter (1) als auch eine ausreichende Stabilisierung in der Supraleitungsphase gewährleistet.

3. Supraleitender Schalter (1) nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Faserleiter mit einer wärmeableitenden Matrix umgeben sind, deren Material hinsichtlich Leitfähigkeit derart ausgewählt ist, daß sowohl der erwünschte Normalleitungswiderstandswert für den Schalter (1) als auch eine ausreichende Stabilisierung in der Supraleitungsphase realisiert ist.

4. Supraleitender Schalter (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 3, der in einem Stromkreis mit einer supra-

0074030

613/81

11

leitende Spule (2) elektrisch verbunden ist, wobei die Wicklungen der Spule (2) ebenfalls Faserleiter enthalten, die aus mit einer supraleitenden Schicht versehenen Fasern bestehen, dadurch gekennzeichnet, daß Schalter (1) und Spule (2) aus einem durchgehenden Faserleiterstrang bestehen, und so wenigstens eine Verbindungsleitung zwischen Schalter (1) und Spule (2) materialeinheitlich ohne Verbindungsstelle ausgeführt ist.

5. Supraleitender Schalter (1) nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Werte der Schichtdicke der Matrix und/oder der Leitfähigkeit des Matrixmaterials im Bereich des Supraleiters des Schalters (1) geringer sind, als die entsprechenden Werte des Supraleiters der Spule (2).

6. Supraleitender Schalter (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß in der Nähe der Faserleiter des Schalters (1) wenigstens ein isolierter Heizdraht (10) angeordnet ist.

7. Supraleitender Schalter (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß in der Nähe der Faserleiter des Schalters (1) ein zusätzlicher, ein Magnetfeld erzeugender Supraleiter angeordnet ist, in dessen Magnetfeldbereich die Faserleiter des Schalter (1) verlaufen.

0074030

